

文章编号: 1000-8152(2007)02-0177-06

基于免疫算法的午饭时期层际高峰交通电梯群控制的动态优化

李中华¹, 谭洪舟¹, 张雨浓¹, 毛宗源²

(1. 中山大学 电子与通信工程系, 广东 广州 510275;

2. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 层际高峰交通是上行高峰、下行高峰与层间交通客流的融合, 午饭交通就是发生在现代办公楼内的层际高峰交通之一. 基于午饭时期层际高峰交通的特点, 本文提出了一种利用人工免疫算法实现电梯群控制动态优化的策略. 该策略采用两级优化控制, 利用常规的THV算法对层站召唤分配实施局部优化, 采用人工免疫算法定时对层站召唤分配实施全局优化. 同单纯的THV算法相比, 本文提出的组合算法将平均的系统等待时间降低了21.26%. 仿真结果表明, 本文提出的优化控制策略能够改善午饭时期电梯系统的服务性能, 具有较好的现实意义和研究价值.

关键词: 电梯群控制; 人工免疫算法; 层际高峰交通; 动态优化

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

Dynamic optimization of elevator group control based on artificial immune algorithm for inter-floor peak traffic during lunch-time

LI Zhong-hua¹, TAN Hong-zhou¹, ZHANG Yu-nong¹, MAO Zong-yuan²

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510275, China;

2. College of Automation Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: Inter-floor peak traffic is a combination of up-peak traffic, down-peak traffic and inter-floor traffic. Lunch-peak traffic is a typical pattern of vertical transportation within a modern office building. Based on the characteristics of lunch-peak traffic, a dynamic optimization strategy of elevator group control is proposed in this paper by utilizing artificial immune algorithm. This strategy has a two-level control structure. One structure is the locally optimal assignment of a hall call performed by THV algorithm; the other is the globally optimal assignment of all hall calls, which is executed periodically by artificial immune algorithm. Compared to THV algorithm, the newly proposed strategy decreased the average system waiting time by 21.26%. Simulation results demonstrated that the performance of elevator system during lunch-time is greatly improved under control of the proposed strategy in this paper.

Key words: elevator group control; artificial immune system; inter-floor peak traffic; dynamic optimization

1 引言 (Introduction)

在电梯交通系统中, 系统等待时间是评估电梯性能的首选标准, 包括候梯时间和乘梯时间^[1]. 同时, 像队列长度、系统能源消耗等辅助标准也被采用^[2]. 常规的电梯群的调度采用IF-THEN逻辑规则. 在这些规则中, THV算法较为常用, 适合于不太高建筑内由2台或者3台电梯组成的电梯群监控系统, 它的软件实现被包括在曼彻斯特理工学院开发的LSD软件包中^[3]. 这种算法集中了并联系统和三

联系统的公共规则, 其分配过程类似于动态分区, 但是没能利用层站召唤的方向信息, 对高峰客流状况提供的服务较差^[4]. 近来提出的一些高级的复杂算法改善了电梯群控系统的性能, 如基于动态规划原理的最优路径算法、动态自适应召唤分配算法等.

人工智能技术的发展为电梯系统的研究注入了新的思想. 基于模糊控制的电梯群控系统^[5]所采用的隶属函数和推理规则都是预先根据专家经验知识而确定的, 不能适应变化的客流状况, 而具有学习能

收稿日期: 2004-10-15; 收修改稿日期: 2006-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60575006,60636004); 广州市科技局科技攻关项目(108B204017); 中山大学青年教师基金资助项目(1131100).

力的神经网络可以弥补这个不足^[6]. 同时, 遗传算法也应用于电梯系统的召唤分配. Cortes等人利用遗传算法对午饭交通期间的层站召唤实施定时分配^[2]. 但是经常会导致优化间隔时间内发生的层站召唤得不到及时的分配, 以至于电梯轿厢在运行过程中会“旁路”层站召唤的应答. 而且也会导致层站召唤的分配在多台电梯之间跳跃而得不到较好的服务.

新近发展起来的人工免疫算法(artificial immune algorithm, AIA), 引起了众多专家学者的研究兴趣. 它具有强大的局部优化搜索能力, 在求解全局最优解方面优势明显. 本文在充分利用THV算法处理层间交通的良好性能的同时, 引入AIA算法, 对午饭时期层际高峰交通下的层站召唤实行两级的动态优化, 使召唤的分配动态地处于最优状态.

2 THV算法原理 (Principle of THV)

THV算法是较常见的一种群控算法, 主要用于2台或者3台电梯为一组的不太高建筑的电梯监控系统^[2]. 以常规的层站召唤系统为基础, THV算法根据轿厢召唤信号, 按照定向分配控制原则进行操作.

根据召唤信号所在的楼层同轿厢间的距离, 并考虑召唤方向和轿厢运行的方向, 可按下述准则来评价实用性系数. 设建筑物内大厅以上的楼层数为 N , 且特定的召唤楼层 f_{nc} 和轿厢所在楼层 f_{cage} 之间的距离 d 简单地以楼层数量来计算, 则

$$d = |(f_{nc} - f_{cage})|. \quad (1)$$

如果轿厢按照召唤方向相同的方向运行至层站, 则给轿厢一个位置偏差, 即

$$Fitness = (N + 2) - d. \quad (2)$$

如果轿厢按照召唤相反的方向运行至层站, 则

$$Fitness = (N + 1) - d. \quad (3)$$

如果轿厢从召唤层离开, 则实用性系数定为1.0, 且与距离无关. 当轿厢空闲时, 则实用性系数按式(3)计算.

3 电梯系统仿真模型 (Simulation model of elevator system)

受文献^[8]启发, 借鉴THV算法处理层间交通的优势和AIA算法优化搜索能力, 根据召唤的分布、轿厢的位置、运行方向等输入状态和约束条件, 实现午饭时期这类复杂交通的优化控制是可能的. 基于AIA的全局优化可弥补THV算法处理底层建筑和高峰客流状况的不足, 而THV算法的引入则克服了包括AIA在内的启发式算法普遍存在的运算耗时间问题, 有助于提高系统召唤分配的实时处理能力.

为了改善午饭时期层际高峰交通客流状况下电

梯群控制系统的性能, 本文拟提出一个两级优化控制结构, 用于动态地分配层站召唤给合适的电梯轿厢来应答服务. 该两级优化控制结构包括: I) 局部优化控制和 II) 全局优化控制. THV算法负责层站召唤的局部优化控制, 突出召唤分配的局部动态性, 能对召唤的分配做出及时应答; 而AIA算法负责召唤的全局优化控制, 强调层站召唤分配的系统性优化, 在总体上保证电梯群控制系统处于最优状态.

为了缩短仿真时间, 采用事件扫描法来推进系统仿真时钟^[9]. 将乘客的到达作为一类事件, 称为事件 E_a ; 将召唤分配的定时优化视为另一类事件, 称为事件 E_b . 时钟推进间隔的长度由下一个最早发生的事件 E_a 或者事件 E_b 确定.

电梯群控系统的仿真模型结构如图1所示. 事件 E_a 服从泊松过程, 当事件 E_a 发生时, 根据THV算法实施层站召唤分配. 事件 E_b 的发生由预先指定的优化间隔时间决定. 当事件 E_b 发生时, 其优化的目标是使得电梯应答完当前所有的轿内指令和层站召唤信号的时间最短, 即

$$\min_a f_{\max} = \min_a \max\{f(L_j) | j = 1, 2, \dots, M\}. \quad (4)$$

其中: M 为电梯数量, a 是层站召唤的一种分配, L_j 为第 j 台电梯轿厢, $f(L_j)$ 为 L_j 的期望应答时间.

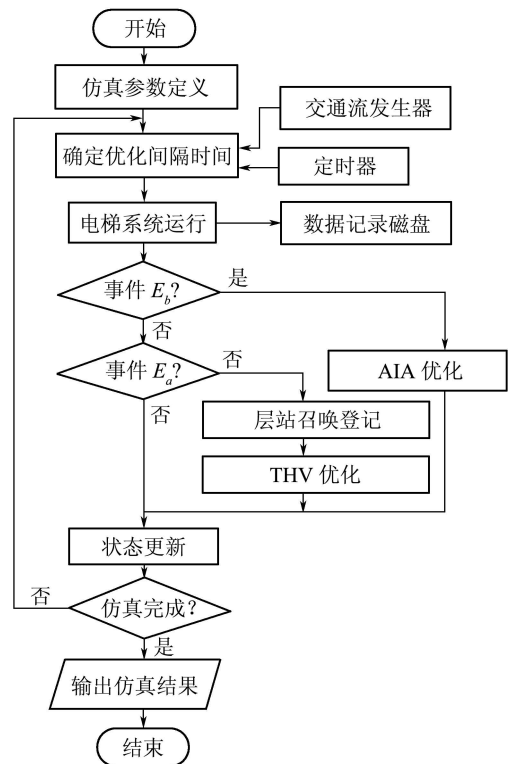


图1 电梯系统的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of elevator system

为了简化 $f(L_j)$ 的计算, 采用如图2所示的4个端

站(P_1, P_2, P_3, P_4), 将轿厢的行程分成3个部分: ($P_1 \rightarrow P_2$), ($P_2 \rightarrow P_3$)和($P_3 \rightarrow P_4$), 分别用位移①②和③表示. 当电梯上行时, P_1 表示电梯当前所在的楼层, P_2 表示电梯上行的最高楼层, P_3 表示电梯反向运行的最低楼层, P_4 表示在楼层 P_1 下方需要服务的最高楼层, 显然 $P_4 < P_1$. 当电梯下行时, 有 $P_4 > P_1$. 那么, 计算 $f(L_j)$ 的数学表达式可写成

$$f(L_j) = f_a(L_j) + f_b(L_j) + f_c(L_j) \quad (5)$$

其中 $f_a(L_j), f_b(L_j), f_c(L_j)$ 分别是 L_j 在①②和③段内的期望服务时间. 由于在乘客进入轿厢之前, 其目的层站是未知的, 因此式(5)没有考虑层站召唤的乘梯行程.

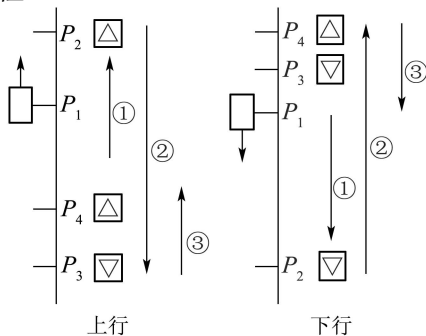


图2 电梯与召唤的位置关系图

Fig. 2 Relationships between elevator and hall calls

当电梯上行时, 以位移①段为例, 包括电梯的运行时间、楼层停靠时间. 设单层运行时间为 t_v , 单层停靠时间为 t_s , 平均转移时间为 t_p , 电梯在①段内需要停靠的楼层数为 N_s , 进出轿厢的乘客数为 N_p , 则

$$f_a(L_j) = (P_2 - P_1) \times t_v + N_s t_s + N_p t_p. \quad (6)$$

$f_b(L_j)$ 和 $f_c(L_j)$ 的计算同式(6)类似. 在召唤分配优化操作结束后, 立即为每台电梯轿厢更新层站召唤任务, 电梯轿厢按照现有的轿内指令和层站召唤任务列表实施应答服务.

4 基于人工免疫算法的电梯群控制动态优化 (Dynamic optimization of elevator group control based on AIA)

AIA依据的主要免疫学原理包括免疫识别、免疫记忆、免疫网络、克隆选择、免疫学习以及多样性、分布性、自适应性等特点^[10]. 本文利用人工免疫系统对电梯层站召唤分配进行周期性的优化, 研究AIA的动态优化同THV分配算法的结合, 对于提高电梯交通的转移效率和质量具有重要的现实意义.

4.1 抗原与抗体 (Antigen and antibody)

抗原系指需要解决的问题——层站召唤分配优化, 根据电梯系统仿真模型的层站召唤分配模块定义, 抗原可用式(4)简单定义.

抗体通常指满足问题解答的可行解, 即层站召唤的合理分配. 在仿真模型中, 每台电梯具有3个任务列表: 轿内指令、上行召唤和下行召唤. 层站召唤分配优化的目的就是为每台电梯配置合理的召唤任务, 即上行召唤和下行召唤. 为此, 定义一个长度为 $2N$ 的抗体 a , N 表示门大厅以上的楼层数, 每个抗体代表着层站召唤对电梯的分配状态. 如图3所示, 在一个11层(不包括大厅)的大楼内, 抗体 a 被分成两部分: 上行交通和下行交通.

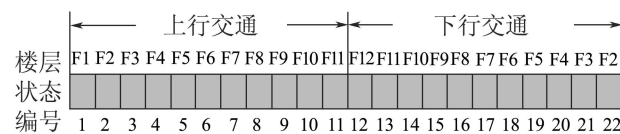


图3 一个11层大楼的抗体基因示意图

Fig. 3 Individual antibody for a building with 11 floors

抗体基因采用字符编码, 设组成电梯群的轿厢数为 M , 则所用字符(0 - M)的数目取决于电梯数量. '0'表示在对应的楼层无层站召唤任务, 非'0'则表示存在层站召唤, 且分配给对应编号的电梯轿厢. 抗体的约束条件是一个层站召唤只能分配给一台电梯, 即只在在一台电梯对应的抗体基因位上为非'0'.

为避免轿厢在当前运行状态下“扑空”, 需要为每个轿厢确定运行目的层站. 如果轿厢在前方无轿内指令, 则在个体初始化时, 为该轿厢预先锁定分配一个层站召唤, 被锁定的层站召唤不再参与优化.

4.2 亲和力 (Affinity)

亲和力是指抗体同抗原的匹配程度, 即层站召唤分配对系统性能最优的满足程度. 在抗体的编码方式确定以后, f_{\max} 关于抗体 a 的函数变为 $f_{\max}(a)$, 亲和力的计算式可表述为目标函数的倒数

$$aff(a) = \frac{A}{A + f_{\max}(a)}. \quad (7)$$

其中 A 是常数, 这里简单的取为 $A = 30$ s, 意指电梯往返一周期望的运行时间. 显然, $f_{\max}(a)$ 越小, $aff(a)$ 越大. 由于 $f_{\max}(a)$ 表示的是电梯服务的最大时间, 因此有 $f_{\max}(a) \geq 0$, 那么 $aff(a) \leq 1$.

4.3 相似度和浓度 (Similarity and concentration)

相似度是指两个候选抗体的相似信息度量, 即两种候选的召唤分配解的相似性. 抗体浓度是指在一定区域内抗体数量的多少. 抗体浓度对于免疫操作具有抑制作用, 抗体浓度越大, 则抑制力越强烈.

设抗体群规模为 Q , 抗体的基因数为 R , 等位基因数目为 S , 则抗体群在第 j 个基因座上的信息熵为

$$H_j(Q) = - \sum_{i=1}^S p_{ij} \log p_{ij}. \quad (8)$$

式(8)中, p_{ij} 为 Q 个抗体中第 j 位基因源于第 i 个等位基因的概率. 抗体群多样性的平均信息熵如下:

$$H(Q) = \frac{\sum_{j=1}^R H_j(Q)}{R}. \quad (9)$$

于是, 抗体 v 和抗体 w 之间的相似度可定义为

$$\text{sim}(v, w) = \frac{1}{1 + H(2)}. \quad (10)$$

从上式可知, 信息熵 $H(2)$ 越小, 相似度越大. 抗体浓度的计算按照式(11)进行,

$$c_v = \frac{\sum_{w=1}^Q ac_{v,w}}{Q}. \quad (11)$$

其中

$$ac_{v,w} = \begin{cases} 1, & \text{sim}(v, w) \geq T_{ac}, \\ 0, & \text{sim}(v, w) < T_{ac}. \end{cases} \quad (12)$$

T_{ac} 是一预先确定的阈值, 在本研究中取为 $T_{ac}=0.9$.

4.4 选择克隆、交叉和变异 (Selective clone, crossover and mutation)

根据抗体的亲和力和浓度进行抗体选择, 可以维持抗体的高亲和力和适度的浓度. 抗体 v 的选择概率是由亲和力概率和浓度抑制概率两部分组成,

$$p_v = \alpha p(f(v)) + (1 - \alpha) p(d(v)) = \alpha \frac{aff(v)}{\sum_{i=1}^N aff(i)} + (1 - \alpha) \frac{1}{N} \exp(-\frac{c_v}{\beta}). \quad (13)$$

其中 α, β 是调节因子, 在本研究中取 $\alpha=0.6$ 和 $\beta=0.4$. 在浓度一定的条件下, 抗体亲和力越大则被选择的概率越大; 在亲和力一定的条件下, 抗体浓度越大则被选择的概率越小. 这样在保留高亲和力的同时, 也保证了抗体的多样性. 对于被选择的抗体, 执行简单倍数克隆操作, 在本文中取 $N_c = 10$.

交叉操作是借鉴遗传算法中染色体的交叉作用, 通过父代抗体的交叉作用生成更加优良的子代抗体是可能的. 本研究采用单点交叉技术来产生新的抗体, 先对抗体群的抗体随机配对, 然后对配对的抗体选择交叉点实施单点交叉操作, 交叉操作生成的子代抗体应当满足抗体的约束条件. 在本文中交叉操作按固定概率选择, 即 $p_c = 0.85$.

变异是生物系统的重要特征, 也是人工免疫系统进化的重要机制. 鉴于本研究的目标问题是电梯群轿厢应答所有层站召唤的时间最短, 抗体的变异操作在应答时间最大与最小的两个轿厢间进行. 根据二者差值的大小, 作出适当的变异操作, 其指导原则是将应答时间最大的轿厢任务减少, 增加应答时间

最小的轿厢任务, 期望通过抗体的变异, 使得二者的差值进一步缩小, 从而提高抗体的亲和力. 变异后产生的新抗体需要满足抗体的约束条件. 在本文中变异操作的概率, 选择 $p_m = 0.05$.

4.5 新抗体的产生和算法终止条件 (Generation of new antibodies and condition of termination)

为了降低AIA的计算量, 保持抗体群的数目恒定, 此处选定抗体群的数目为20. 在每代抗体群的免疫进化后, 直接选择亲和力最大的抗体进入下一代群体, 而不参与交叉、变异操作, 避免产生退化现象. 剩余的新抗体根据抗体的选择率随机选择产生.

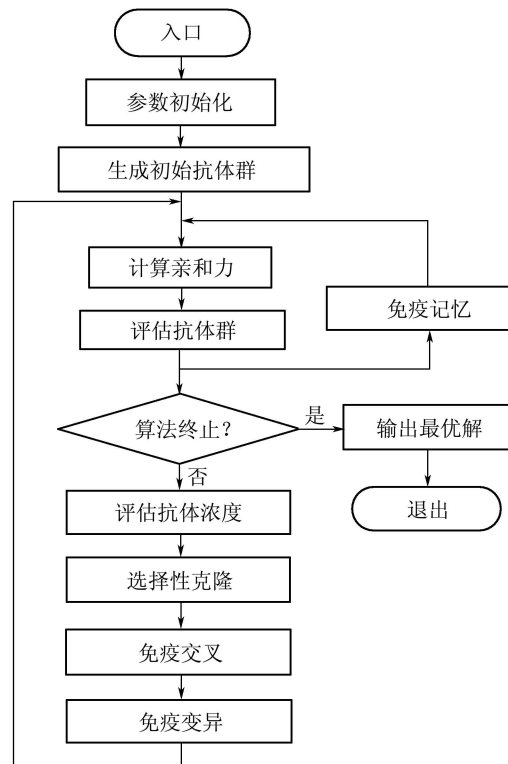


图4 人工免疫算法流程图

Fig. 4 Flowchart of artificial immune algorithm

当运算次数达到指定的代数时, 终止算法, 提取亲和力最大的抗体作为最优解, 并更新电梯轿厢的层站召唤任务列表. 本研究中为AIA算法选择最大的迭代运算 $G_{\max}=20$.

综上, AIA算法的流程如图4所示.

5 仿真实例 (Numerical simulation)

5.1 参数设置 (Parameter settings)

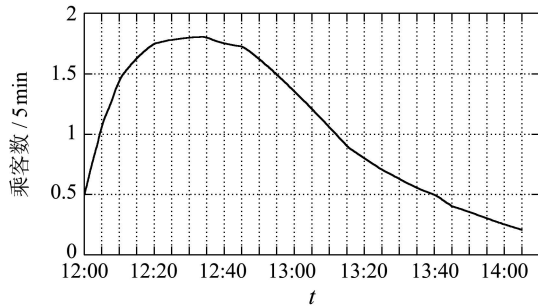
1) 建筑参数和客流分布.

以一座11层(不含大厅层)的建筑物为例, 除第6层和第11层外, 其余每个楼层有30人. 第6层是管理部门, 有60人. 第11层是经理部门, 有15人.

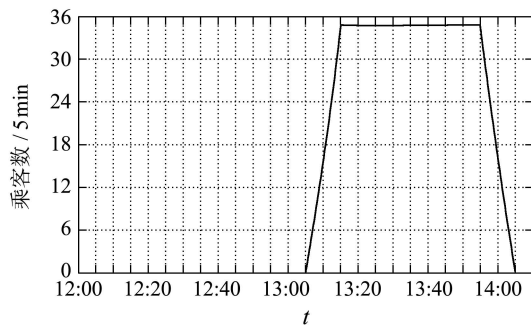
本实例研究午饭时期的层际高峰交通, 其交流数据由楼层客流到达率和客流转移概率确定. 从大厅到第6层的概率为15%, 从大厅到第11层的概率

为4%, 从大厅到其余楼层的概率分别为9%. 从大厅以上任一楼层, 到大厅的概率为95%, 到其他楼层的概率和为5%.

各楼层的客流到达率分布曲线如图5所示. 图5(a)为1~5层和7~10层的乘客到达率, 因楼层职员人数的不同, 第6层和第11层的乘客到达率分别正比例于图5(a); 图5(b)为门大厅的乘客到达率.



(a) 层站乘客到达率(1~5, 7~10层)



(b) 门大厅乘客到达率

图5 各层站的乘客到达率曲线

Fig. 5 Passenger arrival rate of floors

2) 电梯参数.

在建筑内安装有2台完全相同的电梯, 实行并联运行. 电梯的最大载客数为20人, 单层运行时间为1 s, 电梯具有提前开门功能, 开门时间为0.8 s, 关门时间为2.5 s, 加速时间为3 s, 减速时间为3 s, 在门大厅以上楼层的开门逗留时间为3 s, 在门大厅层的开门逗留时间则为5 s, 单位乘客的平均转移时间为1.2 s.

3) AIA算法参数.

AIA算法的相关控制参数依据经验选择: 亲和力度量系数 $A = 30$, 相似度阈值 $T_{ac} = 0.9$, 初始抗体数 $N_{initial} = 20$, 抗体选择克隆控制参数 $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.4$, 克隆倍数 $N_c = 10$, 免疫交叉概率 $p_c = 0.85$, 免疫变异概率 $p_m = 0.05$, 最大迭代数 $G_{max} = 20$.

仿真实验在MATLAB6.5环境下进行^[11], 系统主要配置为CPU1.4GHz, 内存384MB, Windows2000.

5.2 仿真结果 (Simulation results)

对层站召唤分配的AIA全局优化时间间隔的研究发现, 当间隔值从20 s至60 s增加时, 乘客的系统

等待时间变化不太明显, 因此选择60 s作为全局优化间隔时间. 全局优化操作的执行之间约为2.5 s, 完全满足系统的实时性要求.

仿真实例在单纯的THV算法和基于THV算法的AIA优化算法(以下简称AIA+THV算法)之间做了比较, 比较结果取自10次重复仿真的平均值, 分别如表1~表3.

表1是分别基于两种不同群控策略的电梯系统时间性能指标. 相比THV算法, 采用AIA+THV算法的系统平均候梯时间和乘梯时间得到显著地改善, 系统平均候梯时间降低了17.18%, 平均乘梯时间下降了24.84%, 相应地, 乘客的平均等待时间减少了21.26%. 显然, 乘梯时间的减少要归功于电梯停靠次数的降低, 乘客的冲击数^[1]能够准确反应电梯在乘客的乘梯区间内的停靠情况. 在表1中, 乘客的平均冲击数降低了2.04次, 改善约25.09%. 由于AIA+THV算法有效地改善了乘客的系统等待时间, 因而电梯群控系统的长候梯率和长乘梯率有很大程度的降低, 它们分别减少了8.33%和16.39%.

表1 系统时间比较

Table 1 Comparison of system waiting time

指 标	算 法	
	THV	AIA+THV
平均候梯时间/s	57.50	47.62
平均乘梯时间/s	65.33	49.10
平均等待时间/s	122.83	96.72
平均冲击数/次	8.13	6.09
长候梯率/%	40.77	32.44
长乘梯率/%	50.35	33.96

系统性能的比较还反映在系统的能源消耗上. 从表2可知, 引入AIA优化算法以后, 电梯群的起停数和运行距离增加很多, 分别为13.44%和36.36%. 由于电梯系统的能源消耗主要在与电梯曳引机的起停环节^[12], 所以电梯系统的能耗增加了, 但是相比系统等待时间的改善和乘客的满意度而言, 这种能耗增大的代价是值得的. 相应地, 电梯群的轿厢空闲率由THV算法的25.20%降低为18.82%. 正是因为电梯轿厢频繁的运动, 才提供了良好的乘梯服务.

表2 系统能耗比较

Table 2 Comparison of system energy cost

指 标	算 法	
	THV	AIA+THV
空闲率/%	25.20	18.82
起停数/次	639.70	725.70
运行距离/层	1563.80	2132.40

在两种群控算法下,各个楼层的上行、下行候梯队列长度如表3所示.除大厅以外,两种群控算法下的上部各个楼层的平均候梯队列长度和最大候梯队列长度基本相当.引入AIA优化算法后,大厅的上行候梯队列长度的最大值减少了5.2人,平均候梯队列长度则减少了23.08%.显然,利用AIA对层站召唤分配做全局动态优化有利于降低候梯队列的长度.

表3 层站候梯队列长度比较

Table 3 Comparison of length of queues of floors

队列标识	队列长度			
	THV	AIA+THV	THV	AIA+THV
F1(上行)	6.391	4.916	21.80	16.60
F2(上行)	0.800	0.800	0.800	0.800
F3(上行)	0.800	0.800	0.800	0.800
F4(上行)	0.800	0.800	0.800	0.800
F5(上行)	0.600	0.600	0.600	0.600
F6(上行)	0.900	0.900	0.900	0.900
F7(上行)	0.800	0.800	0.800	0.800
F8(上行)	0.400	0.400	0.400	0.400
F9(上行)	0.400	0.400	0.400	0.400
F10(上行)	0.300	0.300	0.300	0.300
F11(上行)	0.100	0.100	0.100	0.100
F12(下行)	1.000	1.000	1.000	1.000
F11(下行)	1.033	1.037	2.000	2.000
F10(下行)	1.034	1.034	2.000	2.000
F9(下行)	1.031	1.031	1.900	1.900
F8(下行)	1.031	1.034	1.900	1.900
F7(下行)	1.113	1.064	2.000	2.000
F6(下行)	1.042	1.038	2.000	2.000
F5(下行)	1.076	1.045	2.000	2.000
F4(下行)	1.072	1.051	2.000	2.000
F3(下行)	1.266	1.048	2.000	1.900
F2(下行)	1.031	1.004	1.600	1.100

比较研究结果表明,引入AIA算法对轿厢的层站召唤任务实施全局性的动态优化,降低了系统的平均乘梯时间和平均等待时间,减少了乘客的冲击数,保持了电梯轿厢空闲率的平衡,减少了大厅的平均候梯队列长度,从总体上改善了电梯系统的性能.

6 结论 (Conclusion)

为改善午饭时期层际高峰交通模式下电梯群的服务性能,本文提出了一种新型的基于AIA的动态优化方案.该方案采用两级控制对层站召唤的分配实行动态优化,利用常规的THV算法对层站召唤分配实施局部优化,采用AIA定时对层站召唤分配实施全局优化.仿真结果表明,本文采用的动态优化策略是可行的,系统的平均等待时间降低了21.26%.

然而,人工免疫算法的参数过多地依赖于经验设置.推动人工免疫算法参数的自适应设置与调整,仍是今后需要着力研究的方向.

参考文献 (References):

- [1] ISHIKAWA T, MIYAUCHI A, KANEKO M. Supervisory control for elevator group by using fuzzy expert system which also addresses traveling time [C]//*Proc of IEEE Int Conf on Industrial Technology*. Bangalore: [s.n.], 2000, 1: 87–94.
- [2] CORTES P, LARRANETA J, ONIEVA L. Genetic algorithm for controllers in elevator groups: analysis and simulation during lunchpeak traffic[J]. *Applied Soft Computing*, 2004, 4: 159–174.
- [3] SIHKONEN M L. *Elevator Group Control with Artificial Intelligence*[M]. Finland: Helsinki University of Technology, 1997.
- [4] Barney G C, dos Santos S M. *Elevator Traffic Analysis, Design and Control*[M]. London: Peter Peregrinus, 1985.
- [5] 李中华, 毛宗源, 郭依林. 一种新的基于模糊控制的电梯群控策略[J]. *控制与决策*, 2004, 19(8): 857–861, 866. (LI Zhonghua, MAO Zongyuan, WU Yilin. A novel elevator group strategy based on fuzzy control[J]. *Control and Decisions*, 2004, 19(8): 857–861, 866.)
- [6] IMASAKI N, KUBO S, NAKAI S, et al. Elevator group control system tuned by a fuzzy neural network applied method[C]//*Proc of 1995 IEEE Int Conf on Fuzzy Systems*. Yokohama: [s.n.], 1995: 1735–740.
- [7] PETERS R, METHA P, HADDON J. Lift passenger traffic patterns: applications, current knowledge and measurement[J]. *Elevator World*, 2000, 48(9): 87–94.
- [8] 李中华, 毛宗源, 伍建平. 基于人工免疫算法的电梯交通动态分区的优化[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(10): 46–51. (LI Zhonghua, MAO Zongyuan, WU Jianping. Optimization of the dynamic zoning for elevator traffic based on the artificial immune algorithm[J]. *J of South China Univ of Technology (Natural Science)*, 2004, 32(10): 46–51.)
- [9] 顾启泰. 离散事件系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. (GU Qitai. *Modeling and Simulation for Discrete Event Systems*[M]. Beijing: Qinghua University Press, 1999: 7–18.)
- [10] 莫洪伟. 人工免疫系统原理及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001. (MO Hongwei. *Theory and Application of Artificial Immune Systems*[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.)
- [11] 李中华, 毛宗源. 基于Matlab的多速度模式电梯群控系统模型仿真[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(8): 1997–2000. (LI Zhonghua, MAO Zongyuan. Matlab-based simulation of elevator group control system with multi-level velocity mode[J]. *J of System Simulation*, 2005, 17(8): 1997–2000.)
- [12] SO A T P, LIU S K. An overall review of advanced elevator technologies[J]. *World Elevator*, 1996, 44(6): 96–103.

作者简介:

李中华 (1977—), 男, 博士, 中山大学电子与通信工程系讲师, 主要从事智能控制理论与应用、电梯系统分析与控制、RFID理论及应用等的研究, E-mail: lizhongh@mail.sysu.edu.cn;

谭洪舟 (1965—), 男, 中山大学电子与通信工程系教授, 博士生导师, 主要从事智能系统与盲信号处理、集成电路设计的研究, E-mail: isthz@mail.sysu.edu.cn;

张雨浓 (1973—), 男, 中山大学电子与通信工程系教授, 博士生导师, 主要从事递归神经网络、冗余机器人和高斯过程计算及优化研究, E-mail: ynzhang@ieee.org;

毛宗源 (1936—), 男, 浙江江山人, 华南理工大学自动化科学与工程学院教授, 博士生导师, 广东省电梯技术学会理事长, 主要从事工业自动化、模式识别与智能系统的研究, E-mail: auzymao@scut.edu.cn.